

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Sensibilidad diferencial de trigo duro, cebada y avena a piroxasulfone

Garrahan, Geraldine¹ , Di Pane, Francisco²  y Yanniccarì, Marcos³ 

1 Comisión de Investigaciones Científicas - Chacra Experimental Integrada Barrow. Tres Arroyos, Buenos Aires, Argentina.

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Chacra Experimental Integrada Barrow Tres Arroyos, Buenos Aires, Argentina.

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de La Pampa - Chacra Experimental Integrada Barrow. Tres Arroyos, Buenos Aires, Argentina.

@ geritagarrahan@gmail.com

Recibido: 18/11/2025

Aceptado: 10/03/2026

Resumen. Trigo duro, cebada y avena son cultivos de importancia regional en Argentina, y a diferencia de cereales mayores, existen pocos herbicidas registrados para el control de malezas, especialmente gramíneas. El objetivo del trabajo fue determinar si existe variación interespecífica en la sensibilidad al herbicida piroxasulfone en trigo duro, cebada y avena. La respuesta al herbicida se estudió en experimentos de crecimiento plumular en caja de Petri, en macetas en cámara de crecimiento y en campo. Se contrastó el comportamiento de los cultivos, evaluando 15 variedades de trigo duro, 11 de cebada y 11 de avena, frente a diferentes dosis de piroxasulfone. Se cuantificó la actividad enzimática de glutatión S-transferasa (GST) como mecanismo de detoxificación involucrado en sensibilidad diferencial. Consistentemente en los diferentes experimentos, avena resultó la especie más sensible al herbicida, presentando un crecimiento relativo significativamente menor a los otros dos cereales. En la mayoría de los experimentos se encontró que cebada fue menos sensible a piroxasulfone que trigo duro. Los resultados de actividad GST mostraron que la mayor sensibilidad al herbicida se asoció a mayores tasas de actividad enzimática. En condiciones de campo, se puso en evidencia la influencia de las precipitaciones en la respuesta de los cultivos a piroxasulfone; sobre el amplio germoplasma evaluado, se destacó la necesidad de considerar múltiples variables para el uso seguro y eficiente de piroxasulfone en sistemas agrícolas.

Palabras clave: herbicida residual; cereales menores; cereales de invierno.

Abstract. Differential sensitivity of durum wheat, barley and oat to pyrooxasulfone. Durum wheat, barley, and oats are regionally important crops in Argentina, and unlike major cereals, few herbicides are registered for weed control, particularly for grass species. The objective of this study was to determine whether interspecific variation in sensitivity to the herbicide pyrooxasulfone exists among durum wheat, barley, and oats. Herbicide response was evaluated through plumule growth assays in Petri dishes, pot experiments in a growth chamber, and field trials. A total of 15 durum wheat varieties, 11 barley varieties, and 11 oat varieties were assessed under different pyrooxasulfone doses. Glutathione S-transferase (GST) enzymatic activity was quantified as a detoxification mechanism potentially involved in differential sensitivity. Across all experimental approaches, oats consistently showed the greatest sensitivity to herbicide, exhibiting significantly lower relative growth than the other two cereals. In most experiments, barley was less sensitive to pyrooxasulfone than durum wheat. GST activity results indicated that greater herbicide sensitivity was associated with higher enzymatic activity rates. Under field conditions, rainfall was a key factor influencing crop response to pyrooxasulfone; across the wide germplasm evaluated, the findings highlight the need to consider multiple variables for the safe and effective use of pyrooxasulfone in agricultural systems.

Key words: residual herbicide; minor cereals; winter cereals.

INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de aumentar la producción agropecuaria hay tres líneas estratégicas de acción en las que se ha propuesto trabajar: incrementar la superficie cultivada, intensificar la producción de los cultivos y aumentar el rendimiento (FAO, 2002). En las últimas cinco décadas se trabajó ampliamente en los dos últimos puntos, logrando reducir los tiempos entre cosechas y obtener mayores rendimientos. Se avanzó también en cuanto a la disponibilidad y costos de fertilizante nitrogenado, mayor rendimiento de los cultivares y nuevos insumos para combatir plagas (Andrade, 2016). Dado que el uso de herbicidas constituye el principal método empleado para el control de malezas en sistemas extensivos, estos productos ocupan un rol central dentro de los programas de manejo (Monaco et al., 2002). Sin embargo,

Cómo citar este trabajo:

Garrahan, G., Di Pane, F. y Yanniccarì, M. (2026). Sensibilidad diferencial de trigo duro, cebada y avena a piroxasulfone. *Semiárida*, 36(2), 5-16.

mientras que para algunos cultivos como maíz existen numerosos productos desarrollados y registrados para el control de malezas (>50), para otros cereales de menor superficie de

producción, los herbicidas disponibles para su uso son menos de la mitad (Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes, 2020; Zandstra & Patricka, 2004).

Ciertos cultivos menores en términos técnicos representan producciones de importancia en economías a nivel regional. Dentro de la categoría de cultivos menores se encuentran *Triticum turgidum* subsp. *durum* L., trigo duro o candeal, y *Avena sativa* L., avena, y *Hordeum vulgare* subsp. *distichum* L. cebada cervecera. Para avena, la producción mundial se sitúa alrededor de 18 y 26 millones de toneladas anuales en los últimos cinco años, mientras que la superficie sembrada en Argentina fluctúa entre 40.000 y 90.000 hectáreas anuales. En la Provincia de Buenos Aires, la avena es el principal verdeo de invierno, abarcando aproximadamente el 62 % de la superficie sembrada en el país para la campaña 2023/2024. De tal modo, si bien se trata de un cultivo menor a nivel país, se considera de importancia para la región sur de la provincia de Buenos Aires. En cebada, mayormente empleada para malteo, la producción mundial está entre 120-180 millones de toneladas anuales, y en Argentina muestra un crecimiento en su superficie, alcanzando las 967.000 hectáreas en la campaña 2018/19, y con el 10,2 % más de superficie en la campaña 23/24. En trigo duro, la producción mundial es menor, estimada entre 5-15 millones de toneladas anuales, y la superficie sembrada en Argentina suele situarse entre 20 y 60 mil hectáreas. El trigo duro a pesar de tener una superficie menor que las anteriores, se siembra mayormente en el sur de la provincia, siendo un cultivo de vital importancia para la industria molinera y fideera (FAO, 2024; MAGyA, 2023; SENASA, 2018; United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service, 2024).

En esos cultivos de gran importancia en la región sur de la provincia de Buenos Aires, el manejo de malezas suele condicionar la producción, principalmente cuando las especies gramíneas dominan en la comunidad de la vegetación espontánea (Thill & Lemerle, 2001; Yannicari et al., 2020). En Argentina sólo existen tres principios activos con acción gramínica para su uso en post-emergencia del cultivo de cebada, no habiendo herbicidas registrados para el control de gramíneas en avena o trigo duro (SENASA, 2022).

Pese a las evidencias de ciertos efectos fitotóxicos de los herbicidas sobre los cultivos tratados, en la gran mayoría de los casos, los beneficios del control de las malezas superan a tales impactos negativos. Los herbicidas selectivos generan una acción fitotóxica mayor sobre la maleza que sobre el cultivo, provocando que la maleza muera y el cultivo sobreviva, superando los efectos competitivos (Gitsopoulos et al., 2024; Larran, 2019). La selectividad es relativa a varios factores como la dosis de herbicida, la fenología del cultivo, el genotipo y el ambiente reinante (Owen, 1991).

En los últimos años, el uso de herbicidas residuales ha adquirido una relevancia creciente en el manejo de malezas en los cereales de invierno, especialmente frente al avance de biotipos resistentes a los tratamientos post-emergentes tradicionales. Estos productos, aplicados antes de la emergencia del cultivo y las malezas, actúan inhibiendo el establecimiento inicial de especies espontáneas. Su empleo permite reducir la densidad inicial de malezas y, por ende, la competencia temprana por agua, luz y nutrientes, etapas críticas para la implantación del cultivo (Chamorro, 2018; Gerhards et al., 2022; Klauk y Petersen, 2023).

Específicamente, para herbicidas pre-emergentes la selectividad puede estar condicionada por la profundidad de siembra, las distintas tasas de crecimiento de las malezas y el cultivo, las diferencias en la absorción y transporte del herbicida dentro de la planta, la tasa de metabolización del producto o la sensibilidad del sitio de acción al herbicida (Chhokar et al., 2012; Jablonkai & Hatzios, 1991). En gran parte de los casos, la selectividad resulta de la interacción de distintos factores, donde se destacan complejos metabolismos diferenciales entre el cultivo que logra detoxificar el herbicida, y la maleza que no lo logra o lo hace a una baja tasa, y perece. Así, se entiende a la detoxificación como el proceso por el cual el herbicida se metaboliza rápidamente a un producto menos o nada tóxico para la planta (Reade, 2010).

Piroxasulfone es un herbicida registrado para su aplicación previo a la emergencia del cultivo de trigo pan y de la maleza y 15 días antes de la siembra de cebada (Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes, 2020). Este principio activo ha surgido como una herramienta

fundamental para el control de gramíneas resistentes a otros herbicidas. Su modo de acción consiste en la inhibición de la biosíntesis de ácidos grasos de cadena muy larga (VLCFA), afecta el desarrollo temprano de las plántulas, evitando la emergencia y el establecimiento de las malezas. Esta característica lo convierte en un valioso recurso para mitigar la presión de selección de la resistencia, especialmente en áreas donde los herbicidas de post-emergencia han perdido efectividad. La recomendación de uso para el trigo es la aplicación en pre-siembra o pre-emergencia, aprovechando su actividad residual prolongada y su baja movilidad en el suelo. Estudios específicos han demostrado que el piroxasulfone controla biotipos tanto susceptibles como resistentes de *Lolium rigidum*, mientras que el trigo muestra una alta tolerancia, lo que respalda su integración en estrategias de manejo de malezas (Nakatani, 2016; Powles & Yu, 2010; Yamahi et al., 2016).

La detoxificación del herbicida piroxasulfone en las plantas, tanto en cultivos tolerantes como en malezas resistentes, involucra principalmente al sistema enzimático del citocromo P450 (CYP450) y las enzimas glutatión S-transferasas (GST). El metabolismo mediado por CYP450 representa la fase inicial del proceso, donde se realiza la oxidación del compuesto, mientras que las GST participan en una fase posterior, conjugando el piroxasulfone con el glutatión para facilitar su secuestro o degradación. El desarrollo de resistencia metabólica al piroxasulfone, por ejemplo, en biotipos de *Lolium rigidum*, se ha asociado con la sobreexpresión de estas enzimas, indicando que una mayor actividad detoxificadora permite a la maleza metabolizar el herbicida más rápidamente que la planta susceptible. El estudio de estas vías de detoxificación es crucial para comprender los mecanismos de resistencia y desarrollar estrategias de manejo más efectivas (Brazier-Hicks et al., 2022; Busi et al., 2018; Cummins et al., 2013; Flores, 2020; Han et al., 2014; Iwakami et al., 2014; Iwakami et al., 2019; Shen et al., 2022).

Sin embargo, pese a la importancia de piroxasulfone en el control de gramíneas resistentes en trigo pan, la tolerancia de otros cereales menores como cebada, trigo duro o avena, ha sido poco documentada. El presente trabajo se llevó a cabo con el objetivo de determinar la sensibilidad relativa de cebada, trigo duro y avena a piroxasulfone, exponiendo en ese sentido, el nivel de variabilidad intraespecífica en el germoplasma disponible en Argentina.

METODOLOGÍA

Material vegetal. En todos los experimentos se empleó la mayor parte del germoplasma disponible en Argentina en los años 2023 y 2024, momento en que se realizaron los ensayos. Cada ensayo se llevó a cabo sobre un grupo amplio de materiales de las tres especies buscando representar la diversidad genotípica de cada una, aunque finalmente el análisis de los datos se realizó sobre el conjunto de cada cereal. Para trigo duro se incluyeron un total de quince variedades: Charito, Facón, Quillén, Cariló, Galpón, Odiseo, Obelix, DL101, DL102, DL103, Athoris, Perla, Zafiro, Cuarzo y Rubí. En el cultivo de cebada las siguiente once variedades fueron incluidas: Paine, Danielle, Yanara, Carisma, Andreia, Alfa, Ayelén, Alhue, Shakira, Montoya y la línea avanzada Bv7302. En avena se pusieron a prueba las siguientes once variedades: Bonaerense INTA (BI) Calén, BI Sureña, BI Maná, BI Aiken, BI Yapa, BI Serena, INTA Liliana, INTA Florencia, INTA Elena, Bonaerense INTA Ministerio de Desarrollo Agrario Lola y la línea avanzada Bw1858.

Experimento a campo. Durante los años 2023 y 2024 se llevaron a cabo dos experimentos de campo en suelos Argiudol petrocálcico de la Chacra Experimental Integrada Barrow para probar la sensibilidad de variedades de trigo duro, cebada y avena a diferentes dosis de piroxasulfone aplicado en pre-emergencia. Siguiendo un diseño en bloques completos aleatorizados, con cuatro repeticiones, se marcaron parcelas de 4 m de largo y se sembraron con máquina de precisión una densidad de 260 semillas de cada variedad por surco sobre el suelo previamente laboreado con doble rastra de disco. La unidad experimental fue un surco de 4 m de largo. Las fechas de siembra fueron: 20, 21 y 31 de julio para cebada, avena y trigo duro respectivamente en 2023, y 10 de julio para todas las especies en 2024. Luego de un día, en pre-emergencia del cultivo, se aplicó el herbicida a evaluar empleando tres diferentes dosis como tratamiento. Para ello se empleó una mochila de precisión con CO₂ como propelente y calibrada para erogar una tasa de aplicación de

130 L ha⁻¹. Se aplicó la mitad de cada parcela (2 m de largo) y otra mitad se mantuvo como testigo apareado sin herbicida. Las dosis de piroxasulfone (Yamato® WG, 85 %) evaluadas fueron 60 g de producto comercial (p.c.) ha⁻¹, 120 g p.c. ha⁻¹ y 240 g p.c. ha⁻¹. Especies espontáneas como *Polygonum aviculare*, *P. convolvulus* y *Raphanus sativus* que se establecieron en el área de experimentación y no son sensibles a piroxasulfone, se controlaron mediante la aplicación de dicamba (Banvel® SL, 57 %) 150 cm³ ha⁻¹ con 2,4-D éster etilhexílico (Herbifen Advance® EC 97 %) 600 cm³ ha⁻¹ en macollaje en todo el experimento.

Luego de 45 días desde la siembra del cultivo se realizó el recuento de estand de plantas en un metro lineal del surco tratado y en un metro del testigo sin herbicida. Con estos datos se calculó el estand relativo de plantas bajo la relación de número de plantas por metro lineal del sector tratado con piroxasulfone dividido por el estand de plantas logrado en un metro del mismo surco sin tratar. Al momento de madurez de cosecha, se recolectó manualmente usando una hoz, la producción de 2 m de cada surco tratado y 2 m del testigo sin herbicida. Seguidamente, las espigas de cebada y trigo duro y las panojas de avena se trillaron y se determinó el rendimiento por surco tratado y sin tratar con herbicida. Se calculó el rendimiento relativo bajo la relación de rinde obtenido en el sector tratado dividido el rendimiento del testigo. Los datos de una misma especie estuvieron compuestos por todas las variedades evaluadas. Éstos fueron sometidos a análisis de la varianza factorial considerando el año del experimento (2023 y 2024), especie (trigo duro, cebada y avena) y la dosis de herbicida (60, 120 y 240 g ha⁻¹) como factores principales. Se empleó la prueba de Fisher (P<0,05) para la comparación de medias. Los análisis se realizaron con el programa estadístico Infostat v.2008 (Di Rienzo et al., 2008).

Efecto de piroxasulfone sobre el crecimiento plumular. Semillas de cada una de las variedades evaluadas se pusieron a germinar en placas de Petri con doble papel absorbente embebido en agua destilada y mantenidas a 28 °C. Luego de 24 hs aquellas semillas en las que era evidente la emergencia de la radícula (≥1mm de largo) fueron transferidas a otra placa con doble papel absorbente humedecido con 10 ml de suspensiones de piroxasulfone (Yamato® WG, 85 %) de 0; 0,001 µM; 0,01 µM; 0,1 µM; 1 µM; 10 µM; 100 µM y 1000 µM. Las mismas se colocaron en cámara de crecimiento con una alternancia de 28 °C/20 °C bajo 8/16 horas de luz (300 µmol m⁻² seg⁻¹)/oscuridad, respectivamente. Luego de cinco días de incubación, se midió el largo de la plúmula con una regla, como variable de sensibilidad al herbicida. Se siguió un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones. La unidad experimental fueron 40 semillas de una misma variedad por placa de Petri. A partir de los datos se determinó el largo plumular relativo para cada variedad y concentración, calculado como el resultado del largo de plúmula tratado con herbicida dividido el largo de plúmula sin herbicida. Los datos de una misma especie estuvieron compuestos por todas las variedades evaluadas. Se empleó un modelo de regresión no lineal log-logístico de tres parámetros como en Yannicari y Gigón (2020) para determinar la relación entre la concentración de piroxasulfone y el crecimiento plumular relativo:

$$y = D / ((1 + (x/I50)^b))$$

donde: y es el crecimiento plumular relativo, D representa la asíntota superior, x es la concentración de piroxasulfone en el medio (µM), I50 representa la concentración de inhibición media del largo plumular y b es la pendiente de la curva en el punto de inflexión. Los valores de I50 obtenidos sobre cada especie fueron comparados con la prueba de F (P<0,05). En todo el análisis se utilizó el programa GraphPad Prism v.8 (GraphPad Software, 2018).

Evaluación de sensibilidad a piroxasulfone en plántulas cultivadas en maceta. Se sembraron macetas de 300 cm³ empleando tierra de los primeros 10 cm de suelo Argiudol petrocalcico de la CEI Barrow. Cada maceta se completó con suelo hasta su tres cuartas partes, se colocaron cinco semillas pre-germinadas como se indicó en el experimento anterior, y en igual estadio de crecimiento (1 a 2 mm de longitud radicular). Luego, las semillas se cubrieron con una capa de 1 cm de espesor de tierra. Inmediatamente se aplicó el correspondiente tratamiento pre-emergente a base de piroxasulfone (Yamato® WG, 85 %), con equipo pulverizador y regulaciones descriptas en el experimento de campo con las siguientes dosis de producto comercial: 60 g p.c. ha⁻¹, 120 g p.c. ha⁻¹, 240 g p.c. ha⁻¹, 360 g p.c. ha⁻¹; manteniendo macetas sin aplicación como control sin tratar.

Luego cada maceta se regó con 60 ml de agua, equivalente a una lámina de 20 mm, para favorecer la biodisponibilidad y acción del herbicida. En los sucesivos días se mantuvo la condición de humedad mediante riegos periódicos, con igual cantidad de agua en cada maceta. El experimento se llevó a cabo en cámara de cultivo a 20 °C bajo iluminación continua (300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{seg}^{-1}$). Luego de 10 días y hasta los 20 días desde la siembra, se evaluó periódicamente el número de plántulas normales emergidas (i.e. sin daños evidentes en términos relativos al correspondiente tratamiento testigo) y la altura de las plantas. Al final de ese período, se cortaron las plantas a nivel del cuello y se determinó el peso fresco de la biomasa aérea de cada planta de cada unidad experimental. En todos los casos, las variables determinadas en cada variedad se relativizaron al correspondiente testigo sin herbicida para contrastar las respuestas al herbicida. Se empleó un diseño experimental completamente al azar con cinco repeticiones donde la unidad experimental fue una maceta. Los datos obtenidos se sometieron a análisis de la varianza factorial considerando el factor especie (avena, trigo duro y cebada) y dosis de herbicida (60, 120, 240 y 360 g ha^{-1}). El contraste de media se realizó empleando el test de Fisher ($P < 0,05$). Los análisis se llevaron a cabo mediante el programa estadístico Infostat v.2008.

Actividad enzimática glutatión S-transferasa (GST). Cincuenta semillas fueron sometidas a germinación en placa de Petri con doble papel absorbente, humedecido con la solución correspondiente al tratamiento indicado (0 μM o 0,01 μM de piroxasulfone), envueltos en papel aluminio (oscuridad), en cámara de crecimiento con temperatura controlada. En cada placa de Petri, los cariopses se dispusieron con el surco ventral hacia abajo, de manera de conservar una misma disposición del embrión frente a las soluciones empleadas como tratamientos. Seis días después de iniciada la germinación se llevó a cabo la extracción del material vegetal en tubos de 1,5 ml en frío empleando buffer de extracción Tris-EDTA como indica la técnica aplicada por Rochalska y Grabowska (2007). La actividad GST se determinó sobre el extracto crudo obtenido, según el protocolo descrito por Robin et al. (2020) donde el sobrenadante se agrega a un buffer de reacción con tampón fosfato Tris-HCl 100mM, pH 6,5 y 1-cloro-2,4-dinitrobenzoceno (CDNB) 1 mM, reactivo colorimétrico sustrato del complejo GST. Se cuantificó la absorbancia en espectrofotómetro (Numak 752 UV-Vis) a 340 nm, cada 30 segundos desde iniciada la reacción y durante 90 segundos, con el fin de obtener una recta cuya pendiente permite calcular la actividad enzimática. Los datos obtenidos se sometieron a análisis de la varianza factorial considerando el factor especie (avena, trigo duro y cebada) y tratamiento (0 μM o 0,01 μM de piroxasulfone). El contraste de media se realizó empleando el test de Fisher ($P < 0,05$). Para ello se empleó el programa estadístico Infostat v.2008.

RESULTADOS

Efecto de piroxasulfone sobre el crecimiento plumular. El crecimiento plumular relativo de los cereales evaluados respondió a la interacción entre la especie considerada y la concentración de piroxasulfone en el medio ($P < 0,001$). Avena se mostró como la especie más sensible al herbicida donde bajo todas las dosis evaluadas presentó un crecimiento relativo significativamente menor a los otros dos cereales. La concentración de inhibición media expuso el siguiente orden de mayor a menor sensibilidad entre los diferentes cultivos avena>cebada>trigo (Figura 1).

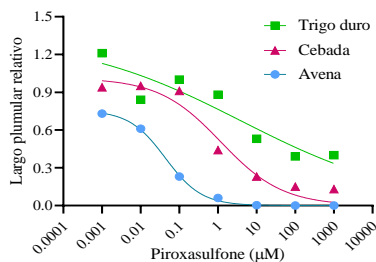


Figura 1. Efecto de piroxasulfone sobre el largo plumular relativo. Los símbolos representan los valores promedio y las líneas los modelos ajustados. Trigo duro: $y = 1,34 / (1 + (x/3,97)^{0,19})$, $R^2 = 0,86$; Cebada: $y = 1,01 / (1 + (x/1,18)^{0,54})$, $R^2 = 0,95$ y Avena: $y = 0,75 / (1 + (x/0,04)^{0,92})$, $R^2 = 0,99$.

Figure 1. Effect of piroxasulfone on relative plumule length. Symbols represent average values and lines represent the fitted models. Durum wheat: $y = 1,34 / (1 + (x/3,97)^{0,19})$, $R^2 = 0,86$; Barley: $y = 1,01 / (1 + (x/1,18)^{0,54})$, $R^2 = 0,95$; Oat: $y = 0,75 / (1 + (x/0,04)^{0,92})$, $R^2 = 0,99$.

Experimento en macetas

Bajo condiciones controladas se comparó la respuesta relativa de crecimiento en altura y en peso fresco de los tres cereales frente a diferentes dosis de piroxasulfone. La respuesta de ambas variables dependió de la interacción entre la especie y la dosis de herbicida aplicada ($P < 0,001$). Considerando la altura relativa de plantas, cebada fue el cultivo menos sensible frente a los otros dos cereales, y presentó la mayor altura relativa a todas las dosis de piroxasulfone evaluadas. Para trigo duro como para avena, las diferencias de sensibilidad entre ellos fueron relativas a la dosis aplicada y en general trigo toleró con menor impacto relativo la dosis más elevada 360 g ha⁻¹ (Figura 2a).

Los resultados obtenidos al considerar el peso fresco relativo de cada cultivo mostraron que cebada fue el cultivo de menor sensibilidad a piroxasulfone, superando en producción relativa de biomasa a los otros dos cereales en todas las dosis de piroxasulfone considerada. Si bien avena toleró con una mayor respuesta de crecimiento relativo la dosis de 60 g ha⁻¹ frente a trigo duro, bajo la dosis más elevada de piroxasulfone éste último cultivo superó a avena en peso fresco relativo (Figura 2b).

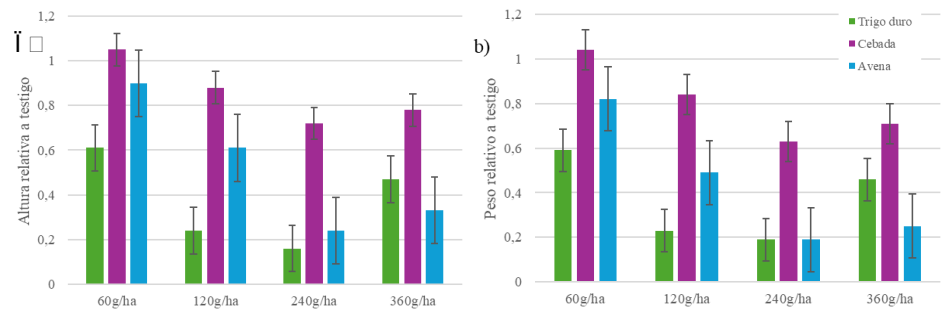


Figura 2. Altura de plúmula relativa a testigo (a) y peso húmedo relativo a testigo (b) del ensayo en macetas de las especies trigo duro, cebada y avena frente a dosis del producto comercial piroxasulfone (85 %) 60 g ha⁻¹, 120 g ha⁻¹, 240 g ha⁻¹ y 360 g ha⁻¹.

Figure 2. Relative plumule height to control (a) and relative fresh weight to control (b) from the pot experiment of the species durum wheat, barley, and oat against piroxasulfone (85 %) doses of 60 g ha⁻¹, 120 g ha⁻¹, 240 g ha⁻¹, and 360 g ha⁻¹.

Experimento a campo

En el año 2023 las precipitaciones acumuladas en los 30 días luego de la aplicación de los tratamientos pre-emergentes fueron de 17 mm (Figura 3a); en tanto en la campaña 2024 se registraron 49 mm en los 30 días posteriores a la aplicación (Figura 3b).

La variación en el estand de plantas relativo al testigo sin tratar se explicó por la interacción entre los tres factores considerados dosis de piroxasulfone, especie cultivada y año ($P < 0,01$). En el año 2023 no se halló un comportamiento diferencial entre especies bajo las tres dosis de herbicida aplicadas. Sin embargo, en el año 2024 los efectos del piroxasulfone sobre la emergencia de plantas mostraron diferencias entre cultivos a la dosis de 120 y 240 g p.c. ha⁻¹ donde avena resultó la especie más sensible (Figura 4).

Al analizar el rendimiento, la sensibilidad de los cultivos evaluados a piroxasulfone dependió de la interacción triple entre el año del experimento, la especie y dosis de herbicida ($P = 0,05$). En el año 2023, considerando cada especie de cultivo, el herbicida no condujo a diferencias significativas en rendimiento en ninguna de las tres dosis aplicadas. La sensibilidad a piroxasulfone de los tres cultivos se evidenció en el año 2024, donde avena mostró el menor rendimiento relativo frente a los otros dos cereales. Incluso para esa campaña, analizando el factor dosis, el herbicida deprimió en mayor medida el rinde de avena bajo la dosis de 240 g p.c. ha⁻¹, lo que resultó significativamente diferente de los valores registrados con dosis más bajas. Una respuesta similar se detectó al analizar

el rendimiento relativo de trigo duro, donde la dosis más elevada de piroxasulfone (240 g p.c. ha⁻¹) produjo una caída significativa en el rinde relativo frente a las dosis de 60 y 120 g p.c. ha⁻¹.

En contraste, el cultivo de cebada no evidenció inhibición del rendimiento relativo; por el contrario, la producción de grano fue significativamente mayor en respuesta a la dosis más elevada del herbicida (Figura 5).

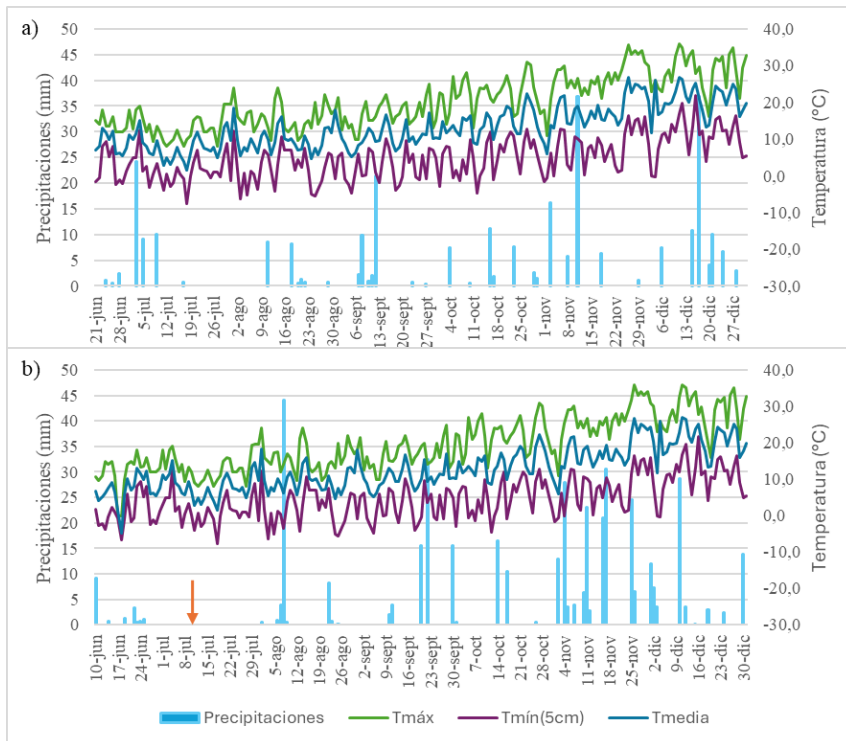


Figura 3. Datos meteorológicos de los años de ensayos de campo 2023(a) y 2024(b). Las barras muestran las precipitaciones diarias y las líneas corresponden a la temperatura máxima, la media y la mínima diarias, durante el período del cultivo. Las flechas indican la fecha de siembra.

Figure 3. Meteorological data from the 2023 (a) and 2024 (b) field trials. Bars show daily precipitation (left y-axis: daily precipitation in mm) and lines correspond to the daily maximum, mean, and minimum temperatures (right y-axis: temperature in degrees Celsius) during the crop period. Arrows indicate the sowing date.

Actividad enzimática glutatión S-transferasa (GST)

La actividad GST mostró una respuesta dependiente de la interacción entre la especie y el tratamiento herbicida (control sin herbicida o 0,01 μ M piroxasulfone). La menor actividad enzimática se registró en cebada tanto con piroxasulfone como sin herbicida. El cultivo de trigo duro mostró una actividad mayor a la detectada en plántulas de cebada, y en respuesta al herbicida no se encontró un aumento significativo en la actividad GST. Las plántulas de avena mostraron la mayor actividad enzimática sin herbicida y aun respondiendo en un incremento significativo de la actividad GST cuando la germinación ocurrió en presencia de piroxasulfone (Figura 6).

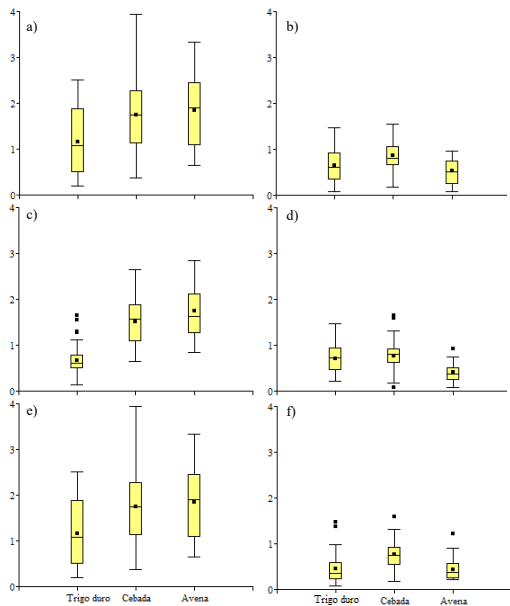


Figura 4. Estand de plantas relativo al testigo sin tratar para los ensayos de campo del año 2023 (izquierda) y 2024 (derecha) para las tres dosis de herbicida: 60 g ha⁻¹ (a y b), 120 gpc ha⁻¹ (c y d) y 240 gpc ha⁻¹ (e y f).

Figure 4. Plant stand relative to untreated control for the 2023 (left) and 2024 (right) field trials for the three herbicide doses: 60 g ha⁻¹ (a and b), 120 g ha⁻¹ (c and d), and 240 g ha⁻¹ (e and f).

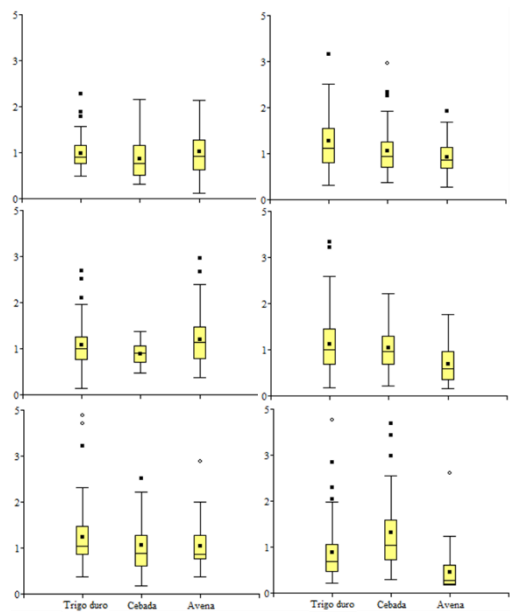


Figura 5. Rendimientos relativos al testigo de los ensayos a campo del año 2023 (izquierda), frente a dosis de producto comercial de piroxasulfone (85 %) 60 g ha⁻¹ (a), 120 g ha⁻¹ (c) y 240 g ha⁻¹ (e), y del año 2024(derecha) para las mismas dosis (b, d y f respectivamente). En todos se compara el comportamiento de las tres especies: trigo candeal, cebada y avena.

Figure 5. Relative yields compared to control from the 2023 field trials (left), against piroxasulfone (85 %) doses of 60 g ha⁻¹ (a), 120 g ha⁻¹ (c), and 240 g ha⁻¹ (e), and from the 2024 trials (right) for the same doses (b, d, and f, respectively). In all cases, the behavior is compared for the three species: durum wheat, barley, and oat.

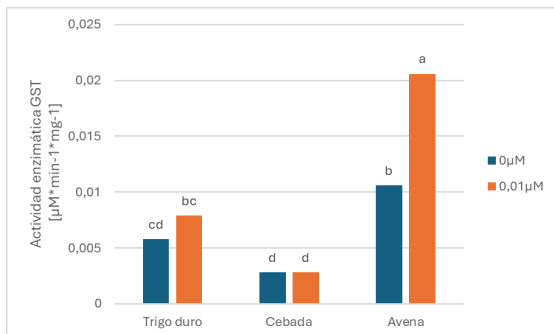


Figura 6. Actividad enzimática glutatión S-transferasa (GST), para las tres especies trigo duro, cebada y avena, en ausencia y presencia de herbicida piroxasulfone $0,01\mu\text{M}$. Letras iguales indican diferencias no significativas ($P > 0,05$).

Figure 6. Glutathione S-transferase (GST) enzymatic activity, for the three species durum wheat, barley, and oat, in the absence and presence of $0.01\mu\text{M}$ piroxasulfone herbicide. Means followed by the same letter are not significantly different ($P > 0.05$).

DISCUSIÓN

Algunos antecedentes han identificado una sensibilidad diferencial a piroxasulfone entre especies de cereales. En ensayos con cereales de siembra de primavera en Canadá, se observó que la dosis de piroxasulfone que causaba una reducción del 20 % en altura permitió establecer el siguiente orden de menor a mayor sensibilidad: trigo pan, cebada, trigo duro y avena (Soltani et al., 2012). En otro trabajo llevado a cabo en Australia, se indicó que, entre los cultivos de cereales evaluados, el trigo pan resultó la especie más tolerante a piroxasulfone, y que especies como cebada y avena mostraron mayor sensibilidad según se incrementaron las dosis aplicadas (Walsh et al., 2011). Estas evidencias coinciden con que la tolerancia a piroxasulfone depende tanto de la especie cultivada como de la dosis aplicada, lo que refuerza la necesidad de considerar la especie-cultivo al diseñar estrategias de aplicación del herbicida. Sin embargo, en ambos antecedentes los estudios se limitan a una única variedad evaluada como representante de cada cultivo y a partir de ello se sugieren respuestas generales a cada cultivo.

En el presente trabajo, los resultados obtenidos en los distintos experimentos muestran consistencia para señalar que la sensibilidad a piroxasulfone difiere entre los cereales de invierno evaluados y que estas diferencias dependen tanto de la especie como de la dosis aplicada. Este contraste interespecífico realizado engloba a una gran proporción del germoplasma de avena, trigo duro y cebada disponible para el cultivo en Argentina.

Bajo condiciones de campo, la ocurrencia y acumulación de lluvias resulta un factor condicionante de la biodisponibilidad del herbicida donde la dosis aplicada solamente no explica la sensibilidad a piroxasulfone si no a través de su interacción con el ambiente determinado por el año de estudio. En el año 2024 las precipitaciones acumuladas en los 30 días posteriores a la aplicación fueron casi tres veces superiores a las del año 2023 y con ello, el impacto en el rendimiento del cultivo de avena incluso a la menor dosis probada (Figura 3).

Por ello, los resultados de la comparación de sensibilidad de los tres cereales en condiciones controladas, cobra trascendencia. El experimento de crecimiento plumular mostró una clara jerarquía de sensibilidad entre cultivos, donde avena fue consistentemente la especie más afectada por piroxasulfone, presentando valores de crecimiento relativo inferiores a cebada y trigo duro en todas las concentraciones evaluadas. Este resultado muestra que existen diferencias intrínsecas entre especies respecto a la capacidad de tolerar piroxasulfone durante las primeras fases del desarrollo.

En coincidencia, los experimentos en macetas evidenciaron este patrón diferenciando la sensibilidad de cada cultivo al herbicida en términos de crecimiento en altura y biomasa. Cebada se mostró como la especie más tolerante, manteniendo los valores relativos más altos en ambas variables frente a todas las dosis evaluadas. Por su parte, trigo duro y avena mostraron una sensibilidad relativa que dependió de la dosis: avena respondió con mayor tolerancia inicial a 60 g p.c. ha^{-1} , pero bajo la dosis más elevada ($360\text{ g p.c. ha}^{-1}$) el patrón se invirtió y trigo duro superó

significativamente a avena en producción de biomasa. Estos resultados indican que los umbrales de tolerancia de las especies no sólo difieren en magnitud, sino que la relación entre ellas puede modificarse según la intensidad del estrés impuesto por piroxasulfone.

El análisis del rendimiento relativo en condiciones de campo sustentó esa tendencia: la sensibilidad se expresó principalmente en 2024, donde avena mostró reducciones significativas en el rendimiento con la dosis más alta de piroxasulfone, mientras que trigo duro presentó un patrón similar, aunque de menor magnitud. De forma llamativa, cebada no sólo evitó pérdidas de rendimiento, sino que respondió con incrementos significativos bajo la dosis más elevada, lo que coincide con su carácter de especie más tolerante evidenciado en los ensayos de crecimiento en germinación e implantación bajo condiciones controladas.

Finalmente, los resultados de actividad GST aportan un posible mecanismo fisiológico subyacente a las diferencias observadas. La mayor actividad basal de GST en plántulas de avena, junto con un incremento significativo inducido por piroxasulfone, sugiere una fuerte activación de rutas de detoxificación en esta especie. Sin embargo, esta respuesta parece insuficiente para evitar la inhibición del crecimiento y la caída en rendimiento observada experimentalmente, lo que podría indicar una respuesta de estrés exacerbada, más asociada a daño que a tolerancia efectiva. En contraste, cebada mostró la menor actividad GST tanto con cómo sin herbicida, lo que plantea que su tolerancia no estaría mediada por un aumento de la detoxificación vía GST. Trigo duro presentó valores intermedios y sin incrementos inducidos por piroxasulfone, coherentes con su sensibilidad moderada.

CONCLUSIONES

La colección de germoplasma argentino que representa el conjunto de variedades puesto a prueba de cada cereal de invierno permite concluir acerca de la sensibilidad de estas especies a piroxasulfone. Los resultados mostraron que las diferencias de sensibilidad entre avena, cebada y trigo duro son consistentes entre experimentos, pero su magnitud y expresión varían según las condiciones ambientales y la intensidad del tratamiento. El patrón convergente indica que cebada es la especie más tolerante, mientras que avena es la más susceptible. Actualmente, piroxasulfone presenta registro de uso en presiembra de cebada, mientras que no se incluyen los otros cereales menores considerados en este trabajo. Así y todo, se ponen en evidencia implicancias prácticas para el manejo de malezas en cereales de invierno, especialmente en escenarios de mayor humedad del suelo tras la aplicación. Este trabajo enfatiza la necesidad de considerar múltiples variables en la toma de decisiones para el uso seguro y eficiente de piroxasulfone en sistemas agrícolas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, F. H. (2016). *Los desafíos de la agricultura*. Editorial International Plant Nutrition Institute.
- Brazier-Hicks, M., Franco-Ortega, S., Watson, P., Rougemont, B., Cohn, J., Dale, R., & Edwards, R. (2022). Characterization of Cytochrome P450s with Key Roles in Determining Herbicide Selectivity in Maize. *ACS Omega*, 7(20), 17416-17431. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01705>
- Busi, R., Porri, A., Gaines, T. A., & Powles, S. B. (2018). Pyroxasulfone resistance in *Lolium rigidum* is metabolism-based. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 148, 74-80. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2018.03.017>
- Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes (2020). Industria de fitosanitarios en Argentina. <https://www.casafe.org/archivos-descarga/Informe-Casafe-Industria-de-Fitosanitarios-en-Argentina.pdf>
- Chamorro, A. M. (2018). Análisis del impacto sobre la sustentabilidad de la difusión de la colza y de la cebada en reemplazo del trigo en la secuencia trigo/soja 2ª en el Partido de Tres Arroyos [Tesis doctorado], Universidad Nacional de La Plata, Argentina. https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/68806/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Chhokar, R. S., Sharma, R. K., & Sharma, I. (2012). Weed management strategies in wheat-A review. *Journal of Wheat Research*, 4(2), 1-21. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:86268850>
- Cummins, I., Wortley, D. J., Sabbadin, F., He, Z., Coxon, C. R., Straker, H. E., ... & Edwards, R. (2013). Key role for a glutathione transferase in multiple-herbicide resistance in grass weeds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(15), 5812-5817. <https://doi.org/10.1073/pnas.1221179110>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. (2008). InfoStat (Versión 2008) [Software de computación]. Grupo InfoStat. <http://www.infostat.com.ar>
- FAO. (2002). El estado mundial de la pesca y la acuicultura, 2002. Food & Agriculture Org.

- FAO. (2024). FAOSTAT data: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Flores, A. O. (2020). Rol de la glutatión-S-transferasa y del citocromo P450 en la resistencia metabólica a herbicidas en *Lolium rigidum* de cereales de invierno. [Tesis de Maestría], Universitat de Lleida, España. <http://hdl.handle.net/10459.1/69446>
- Gerhards, R., Messelhäuser, M. H., & Sievernich, B. (2022). Suppressing *Alopecurus myosuroides* in winter cereals by delayed sowing and pre-emergence herbicides. *Plant Soil Environment*, 68(6), 290-298. <https://doi.org/10.17221/118/2022-PSE>
- Gitsopoulos, T., Georgoulas, I., Botsoglou, D., & Vazanelli, E. (2024). Response of Wheat to Pre-Emergence and Early Post-Emergence Herbicides. *Agronomy*, 14(8), 1875. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081875>
- GraphPad Software. (2018). GraphPad Prism (Versión 8.0) [Software de computación]. <https://www.graphpad.com>
- Han, H., Yu, Q., Vila-Aiub, M., & Powles, S. B. (2014). Genetic inheritance of cytochrome P450-mediated metabolic resistance to chlorsulfuron in a multiple herbicide resistant *Lolium rigidum* population. *Crop Protection*, 65, 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.07.014>
- Iwakami, S., Endo, M., Saika, H., Okuno, J., Nakamura, N., Yokoyama, M., Watanabe, H., Toki, S., Uchino, A. & Inamura, T. (2014). Cytochrome P450 CYP81A12 and CYP81A21 are associated with resistance to two acetolactate synthase inhibitors in *Echinochloa phyllopogon*. *Plant Physiology*, 165(2), 618-629. <https://doi.org/10.1104/pp.113.232843>
- Iwakami, S., Kamidate, Y., Yamaguchi, T., Ishizaka, M., Endo, M., Suda, H., Nagai, K., Sunohara, Y., Toki, S., Uchino, A., Tominaga, T., & Matsumoto, H. (2019). CYP 81A P450s are involved in concomitant cross-resistance to acetolactate synthase and acetyl-CoA carboxylase herbicides in *Echinochloa phyllopogon*. *New Phytologist*, 221(4), 2112-2122. <https://doi.org/10.1111/nph.15552>
- Jablunkai, I., & Hatzios, K. K. (1991). Role of glutathione and glutathione S-transferase in the selectivity of acetochlor in maize and wheat. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 41(3), 221-231. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8927-7_11
- Klauck, B., & Petersen, J. (2023). Influence of Sowing Date of Winter Cereals on the Efficacy of Cinmethylin on *Alopecurus myosuroides* (Huds.). *Agronomy*, 13(1), 37. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010037>
- Larran, A.S. (2019). Resistencia a herbicidas en poblaciones del género *Amaranthus*: mecanismos moleculares y expresión de alelos als resistentes en plantas de *A. Thaliana* y trigo. [Tesis de Doctorado], Universidad Nacional de Rosario, Argentina. <http://hdl.handle.net/11336/80972>
- MAGyA. (2023). Estadísticas de producción y superficie por cultivo. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina. <http://www.magyp.gob.ar/>
- Monaco, T. J., Weller, S. C., & Ashton, F. M. (2002). *Weed science: principles and practices* 4th edn. (pp 80). Ed. John Wiley & Sons.
- Nakatani, M., Yamaii, Y., Honda, H., & Uchida, Y. (2016) Development of the novel pre-emergence herbicide pyroxasulfone. *Journal of Pesticide Science*, 41(3), 107-112. <https://doi.org/10.1584/jpestics.J16-05>
- Owen, W. (1991). Herbicide Metabolism as a Basis for Selectivity. In W. Owen, *Target Sites for Herbicide Action. Topics in Applied Chemistry* (pp 285-314). Springer, Boston, MA: Kirkwood, R.C. (Eds). https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2433-9_11
- Powles, S. B., & Yu, Q. (2010). Evolution in Action: Plants Resistant to Herbicides. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 317-347. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112119>
- Reade, C. A. (2010). *Herbicides and Plant*. Editorial Wiley. Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781444327793>
- Robin, S. K., Ansari, M., y Uppugunduri, C. R. (2020). Spectrophotometric Screening for Potential Inhibitors of Cytosolic Glutathione S-Transferases. *Journal of Visualized Experiments*, (164), e61347. <https://doi.org/10.3791/61347>
- Rochalska, M., & Grabowska, K. (2007). Influence of magnetic fields on the activity of enzymes: a- and b-amylase and glutathione S-transferase (GST) in wheat plants. *International Agrophysics*, 21(2), 185-188. <https://doi.org/10.2478/v10102-008-0008-x>
- Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). (2018). Resolución 829/2018: Cultivos menores. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-829-2018-316471>
- Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). (2022). Registro Nacional de Terapéutica Vegetal. <https://aps2.senasa.gov.ar/vademecum/app/publico>
- Shen, J., Yang, Q., Hao, L., Zhang, L., Li, X., & Zheng, M. (2022). The Metabolism of a Novel Cytochrome P450 (CYP7B34) in Tribenuron-Methyl-Resistant *Descurainia sophia* L. to Herbicides with Different Mode of Actions. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10), 5812. <https://doi.org/10.3390/ijms23105812>
- Soltani, N., Shropshire, C., & Sikkema, P. H. (2012) Response of Spring Planted Cereals to Pyroxasulfone. *International Research Journal of Plant Science*, 3(6), 113-119. <https://www.interesjournals.org/articles/response-of-spring-planted-cereals-to-pyroxasulfone.pdf>
- Thill, D. C., & Lemerle, D. (2001). World wheat and herbicide resistance. In *Herbicide resistance and world grains*. (pp. 165-194). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420039085>

- Yamahi, Y., Honda, H., Hanai, R., & Inoue, J. (2016). Soil and environmental factors affecting the efficacy of pyroxasulfone for weed control. *Journal of Pesticide Science*, 41(1), 1-5. <https://doi.org/10.1584/jpestics.D15-047>
- Yannicari, M., Gigón, R., & Larsen, A. (2020). Cytochrome P450 herbicide metabolism as the main mechanism of cross-resistance to ACCase-and ALS-inhibitors in *Lolium* spp. populations from Argentina: a molecular approach in characterization and detection. *Frontiers in Plant Science*, 11, 600301. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.600301>
- Yannicari, M., & Gigón, R. (2020) Cross-resistance to acetyl-CoA carboxylase-inhibiting herbicides conferred by a target-site mutation in perennial ryegrass (*Lolium perenne*) from Argentina. *Weed Science*. <https://doi.org/10.1017/wsc.2020.1>
- United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. (2024). Production, Supply and Distribution (PSD) by crop [Base de datos]. <https://www.fas.usda.gov/data>
- Walsh, M. J., Fowler, T. M., Crowe, B., Ambe, T., & Powles, S. B. (2011) The Potential for Pyroxasulfone to Selectively Control Resistant and Susceptible Rigid Ryegrass (*Lolium rigidum*) Biotypes in Australian Grain Crop Production Systems. *Weed Technology*, 25, 30-37. <https://ahri.uwa.edu.au/wp-content/uploads/2014/10/433-Michael-Walsh-2011-paper.pdf>
- Zandstra, B., & Patrick, M. (2004). Guide to tolerance of crops and susceptibility of weeds to herbicides. Kentucky: Michigan State University. [https://www.canr.msu.edu/uploads/resources/pdfs/Guide_To_Tolerance_of_Crops_\(E2833\).pdf](https://www.canr.msu.edu/uploads/resources/pdfs/Guide_To_Tolerance_of_Crops_(E2833).pdf)